



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÍZKOPŘÍKONOVÝ MODUL S TERMOKAMEROU**

LOW POWER MODULE WITH THERMOCAMERA

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Daniel Horák

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jan Chalupa

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Daniel Horák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Chalupa**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Nízkopříkonový modul s termokamerou

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Termokamera může sloužit jako vhodný nástroj pro teplotní diagnostiku strojů. Z pořízených snímků lze stanovit, která místa stroje jsou tepelně namáhána, případně lze lépe lokalizovat zdroj poruchy (např.: porušená izolace vedení, přehřívající se součástky apod.)

### Cíle bakalářské práce:

- 1) Seznamte se s vybraným typem termokamery a vytvořte jednoduchý obvod pro připojení k platforme EduKIT používaný v mechatronické laboratoři.
- 2) Vytvořte knihovnu v programovacím jazyce C, která bude sloužit pro nastavení kamery a přepočty teplot získaných z čipu.
- 3) Proveďte rešerši na téma jednoduché bezztrátové kompresní algoritmy, které lze implementovat na hardware s nízkým výpočetním výkonem a omezenou pamětí.
- 4) Nejvhodnější algoritmus implementujte na vybraném mikrokontroléru.
- 5) Proveďte přenos a dekompresi a vykreslení obrazu v prostředí Matlab nebo Python.

### Seznam doporučené literatury:

MIŠUREC, J., ZEMAN, V., ŠTĚPÁN, M. Konstrukce elektronických zařízení - návrh plošných spojů. Brno, 2003.

KREIDL, Marcel. MĚŘENÍ TEPLITY - senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 230 s. ISBN 80-7300-145-4.

JUNG, W. Op Amp Applications Handbook. Burlington (USA): Newnes (Elsevier), 2005.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca je zameraná na bezkontaktné meranie teploty pomocou vybranej termokamery a bezstratovú kompresiu obrazu získaného touto kamerou. V rešeršnej časti sú popísané teoretické princípy pre lepšie pochopenie danej problematiky a v praktickej časti samotné riešenie, vyhotovené pre danú termokameru.

## **KEÚČOVÉ SLOVÁ**

termočlánok, termokamera, MLX90621, tepelné žiarenie, bezstratová kompresia, delta kompresia

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on contactless temperature measuring with given thermographic camera and lossless image compression obtained by this camera. The theoretical part describes principles for better understanding of the issue and the practical part contains the solution itself, prepared for above mentioned thermographic camera.

## **KEYWORDS**

Thermocouple, thermographic camera, MLX90621, heat radiation, lossless compression, delta compression

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

HORÁK, Daniel. *Nízkopříkonový modul s termokamerou*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117971>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Chalupa.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Chalupy s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 22. mája 2019

.....

Daniel Horák

## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som sa chcel poďakovať môjmu vedúcemu práce Ing. Janovi Chalupovi za jeho ochotu a cenné rady pri tvorbe tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať kolegom za pomoc a poskytnuté informácie.

# OBSAH

Úvod .....	9
1 Rešerš .....	10
1.1 Bezkontaktné meranie teploty .....	10
1.2 Bezstratová kompresia .....	11
2 Realizácia zariadenia .....	13
2.1 MLX90621 .....	13
2.2 Mikrokontrolér a programovanie .....	25
2.3 Dekompresia dát a ich vykreslenie .....	28
2.4 Testovanie a prezentácia výsledkov .....	30
Záver .....	32
Zoznam použitých skratiek .....	34
Zoznam príloh .....	35



# Úvod

Termokamery sa používajú pre bezkontaktné snímanie teploty. Teplotu telies vyhodnocujú na základe ich intenzity žiarenia. Je to vhodný spôsob pre určovanie teploty na miestach, kde je nemožné kontaktné snímanie, alebo je potrebné pokrytie väčšej plochy. Môžu to byť napríklad pohybujúce sa časti strojov, zisťovanie porušenej izolácie vedenia a podobne. Podľa spôsobu meraní intenzity žiarenia sa termokamery rozdeľujú na niekoľko typov.

Táto práca sa podrobnejšie zaoberá termokamerou snímajúcou teplotu na princípe termočlánku. Princíp termočlánku je podrobnejšie popísaný v rešeršnej časti práce. Taktiež je tu popísaný aj princíp žiarenia, ktoré sníma ako aj spôsob bezstratového spracovania obrazu získaného z kamery. V praktickej časti je vybraná termokamera podrobne popísaná. Termokamera je pripojená ku vývojovej doske EduKIT a je pre ňu napísaná knižnica pre získanie dát z termokamery a výpočet snímanej teploty, taktiež nastavenie termokamery. Na EduKITe ešte prebieha kompresia nasnímaných teplôt a posielanie do PC. Teploty sú v PC dekomprimované a vykresľované.

# 1 Rešerš

## 1.1 Bezkontaktné meranie teploty

Pre bezkontaktné snímanie teploty sa používajú detektory, ktoré snímajú elektromagnetické žiarenie a na základe intenzity tohto žiarenia zisťujú teplotu objektu.

### 1.1.1 Tepelné žiarenie

V systéme v ktorom nie je možné prenášať teplo pomocou žiadnej sprostredkujúcej látky napr. vo vákuu sa teplo prenáša žiarením. Tepelné žiarenie je výsledkom tepelnej diferencie. Bez ohľadu na typ elektromagnetického žiarenia je žiarenie prenášané rýchlosťou svetla, ktorá je  $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ . Táto rýchlosť je rovná súčinu vlnovej dĺžky  $\lambda$  a frekvencie  $f$ :  $c = \lambda \cdot f$ . Tepelné žiarenie leží v rozsahu vlnových dĺžok od  $0,1 \mu\text{m}$  po  $100 \mu\text{m}$  (napr. pre viditeľné svetlo leží v rozsahu  $0,35 \mu\text{m} - 0,75 \mu\text{m}$ ). Pevné látky, kvapaliny a niektoré plyny emitujú tepelné žiarenie, pretože majú teplotu vyššiu než 0K. Ideálny teplotný žiariteľ je čierne teleso. Čierne teleso emituje tepelné žiarenie, ktoré je úmerné štvrtej mocnine absolútnej teploty povrchu telesa. Čierne teleso slúži ako referenčné teleso pre porovnanie vyžarovania reálneho telesa, tento pomer sa nazýva pomerná žiarivosť alebo aj emisivita. Reálne teleso má vždy menšiu žiarivosť ako čierne teleso. Pri teplotách do cca  $500^\circ\text{C}$  sa významné elektromagnetické žiarenie objavuje v oblasti infračerveného žiarenia na vlnových dĺžkach, ktoré sú pre ľudské oko príliš dlhé. Pri narastaní teploty povrchu, sa energetické rozloženie posúva do oblastí kratších vlnových dĺžok a pri teplote zhruba do  $700^\circ\text{C}$  už môže byť aj ľudským okom pozorovateľná tmavá červen na povrchu telesa. Čím je teleso na povrchu teplejšie, tým viac je pre ľudské oko svetlejšie. Pri dopadaní žiarivej energie na reálne teleso sa časť energie odrazí, časť je pohltaná (absorbovaná) a časť môže prejsť. Pre správne určenie absorpcie telesa je potrebné poznať zdroj žiarivca, čo je v praxi takmer nemožné. Preto sa používa Kirchhoffov zákon, ktorý hovorí o tom, že keď je dané teleso v tepelnej rovnováhe s okolím, platí rovnosť medzi absorptanciou (schopnosť telesa pohlcovať energiu) a pomernou žiarivosťou (emisivitou).[1]

### 1.1.2 Detektory žiarenia

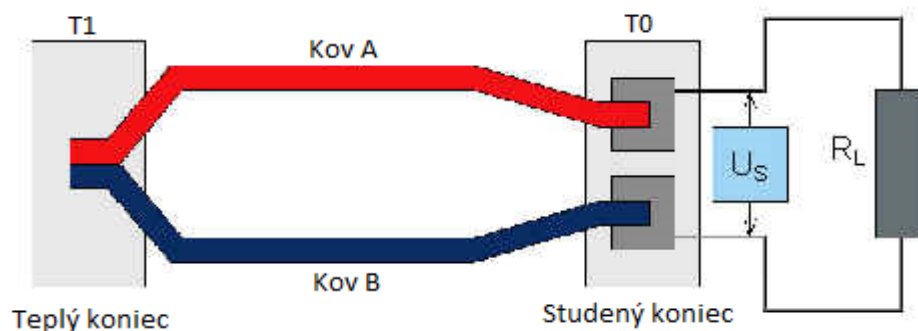
Detektory (senzory) žiarenia zahŕňajú zariadenia schopné zisťovať prítomnosť žiarivej energie, prípadne ju merať. Podľa spôsobu interakcie žiarenia s látkou detektoru ich môžeme rozdeliť na dve skupiny, tepelné detektory a kvantové detektory. Tepelné detektory integrujú absorbovanú žiarivú energiu a vyhodnocujú zmenu teploty detektoru. Sú to napríklad termoelektrické detektory, bolometre a pyroelektrické detektory. Kvantové detektory reagujú na absorbované fotóny excitáciou voľných nosičov náboja, fotoelektrický jav. Je to napríklad fotoodpor, fotodioda. Detektory žiarenia patria medzi meniče neelektrickej energie na elektrickú.[2]

Pri tepelných detektoroch sa nedá ich teplota merať priamo, preto je potrebné ju previesť na inú veličinu. U termoelektrických detektoroch sa meria zmena termoelektrického napätia dvojice vodičov. Termoelektrické napätie vzniká vplyvom rozdielu teplôt medzi meracím a zrovnávacím spojmom. Bolometry využívajú zmenu elektrického odporu elementu detektoru na základe zmeny jeho teploty. Pyroelektrické detektory využívajú teplotnú zmenu elektrostatickej polarizácie.[2]

### 1.1.3 Termoelektrický detektor

Termoelektrické detektory využívajú tepelné javy. Fyzikálnou podstatou je existencia kontaktného potenciálu na povrchu každého kovu. Elektróny z povrchu kovu nemôžu vystupovať samovoľne. Kovy sú látky zložené z atómov, ktoré majú na vonkajšej valenčnej sfére jeden alebo dva elektróny. Tieto elektróny sú ku svojmu jadru slabo viazané. Ohriatím už na izbovú teplotu sa od svojho jadra odtrhnú a stávajú sa voľnými. Ohrievaním získavajú elektróny kinetickú energiu. Rýchlostná zložka kinetickej energie je stredná hodnota tepelnej

rýchlosti elektrónov. Určitý počet elektrónov s takto získanou tepelnou rýchlosťou prenikne na povrch. Nad povrchom je ale výslednica príťažlivých síl rôzna od nuly a smeruje dovnútra kovu, čo značí, že emitované elektróny sú príťahované späť do látky. Elektrický náboj zhluku emitovaných elektrónov vytvorí elektrické pole, ktoré bráni ďalšej emisii elektrónov. Pre každú teplotu látky sa tak ustáli určitý počet emitovaných elektrónov. Čím vyššia bude teplota látky, tým bude uvoľňovanie elektrónov intenzívnejšie. Na povrchu bráni výstup elektrónov tzv. potenciálna bariéra. Pretože štruktúra rozličných kovov je rôzna, bude aj hodnota potencionalnej bariéry iná. Ak uvažujeme styk dvoch kovov A a B, je smer voľných elektrónov kolmý k rovine styku a pri určitej rýchlosti môžu elektróny z kovu A vstúpiť do kovu B. Ak uvažujeme prípad styku dvoch kovov kedy má kov A potenciálnu bariéru väčšiu než kov B, budú voľné elektróny prechádzať z kovu A do kovu B. Kov A bude mať nedostatok elektrónov a bude sa nabíjať kladne zatiaľ čo kov B záporne. V prípade že v mieste styku kovov A a B je teplota nižšia než na ich voľnom konci, bude kmitanie kryštálovej mriežky na teplejšej strane intenzívnejšie než na strane chladnejšej. Vzájomnými zrážkami iónov a elektrónov sa zvýši stredná hodnota rýchlosti neusporiadaného pohybu elektrónov, čo znamená, že elektrónový plyn sa bude ohrievať zhodne s inotajmi kryštálovej mriežky. Zväčšeným tepelným pohybom budú elektróny difundovať smerom ku chladnejšiemu koncu. Presun elektrónov z teplejšieho konca smerom ku chladnejšiemu spôsobí, že teplejší sa bude nabíjať kladne zatiaľ čo studený záporne. Kov B vplyvom difúzie elektrónov zmení rozloženie nábojov iba nepatrne. Elektromotorické napätie teplejšieho spoja bude väčšie než elektromotorické napätie chladnejšieho spoja. Rozdiel elektromotorických napätí dvoch rôznych kovov bol zisťovaný experimentálne a je zapísaný v tabuľkách. [2] Príklad schémy termoelektrického detektoru je na obrázku 1.



Obrázok 1 Schéma termoelektrického detektoru [6]

Termoelektrické články sú pre aplikácie termoelektrických detektorov konštruované z tenkých pásov. Merací (voľný) spoj je začiernený pre lepšiu absorpciu vstupného žiarenia. Pre väčšiu stabilitu sú vákuovo zapuzdrené. Nevýhodou termoelektrických článkov je pomalá reakcia ktorá sa pohybuje medzi 0,1 až 1 s. Naparované typy termočlánkov sú zhruba 10x rýchlejšie. [2]

## 1.2 Bezstratová kompresia

Podľa typu sa kompresia rozdeľuje na stratovú a bezstratovú. Stratová kompresia sa vyznačuje lepším kompresným pomerom, čo znamená, že veľkosť dát je možné komprimovať na menšiu veľkosť ako pri bezstratovej kompresii. Avšak pôvodné dáta už nie je možné dekomprimovať na identické ako pred kompresiou.[4]

Bezstratová kompresia je taká kompresia, pri ktorej je možné komprimované dáta spätne zrekonštruovať tak, že nedôjde ku žiadnym zmenám vzhľadom ku pôvodným dátam. Vzhľadom ku aplikáciám sú najvhodnejšie metódy RLE (kódovanie dĺžkami sekvencií) a delta kompresia.[4]

Pri RLE kompresii sa zapisuje indikátor kompresie, za ním sa zapíše požadovaná hodnota a koľko krát za sebou nasleduje. Kompresia sa stáva účinnou až pri opakovaní rovnakých za sebou idúcich znakov viac ako 3-krát. Pre rovnaké znaky, ktoré sú za sebou menej ako 3-krát dochádza ku expanzii dát, čím sa stáva kompresia neúčinná. Stále je potrebné pri kompresii používať indikátor. Indikátor je možné nahradiť napríklad 3-krát po sebe idúcim rovnakým znakom a za ním zapísať počet zvyšných rovnakých znakov. Pri takejto kompresii sa kompresia stáva účinná až pri opakovaní aspoň piatich rovnakých znakov.[4]

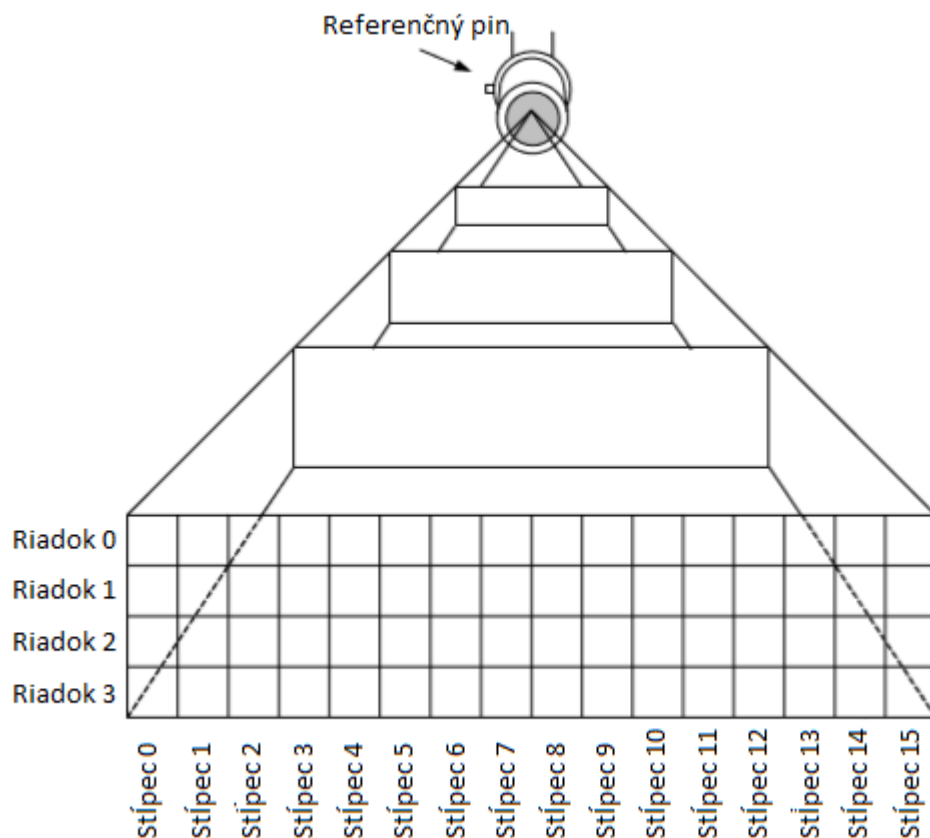
Delta kompresia je užitočná pri lineárnom raste alebo poklese dát. Prebieha odčítavaním hodnoty od hodnoty ktorá sa nachádza pred ňou. Nakoľko pri snímaní termokamerou je predpoklad, že teplota bude od snímaného objektu klesať alebo stúpať lineárne, vzhľadom ku šíreniu tepla do priestoru. Veľkosti vedľa seba ležiacich pixelov, budú mať podobnú hodnotu a tým pádom sa delta kompresia pre danú aplikáciu javí ako lepší spôsob než RLE kompresia.[4]

## 2 Realizácia zariadenia

Zariadenie sa skladá z termokamery MLX90621, ktorá je pripojená ku vývojovej doske EduKIT. Snímané dáta sú spracovávané pomocou EduKITu a následne sa posielajú do PC kde sú vykresľované.

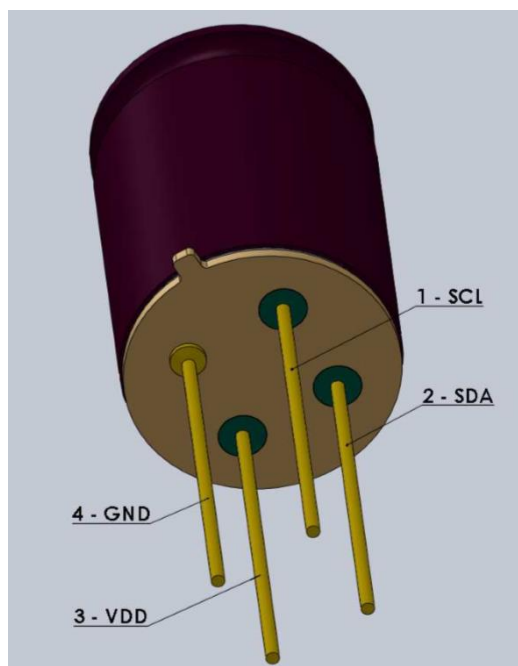
### 2.1 MLX90621

MLX90621-BAD je termokamera snímajúca tepelné žiarenie na princípe termočlánkov. Na obrázku 2 je znázornené snímané pole touto termokamerou, ktoré má 16x4 pixelov s polom záberu 40°x10°.[3]



Obrázok 2 Snímané pole s popisom uloženia pixelov [3]

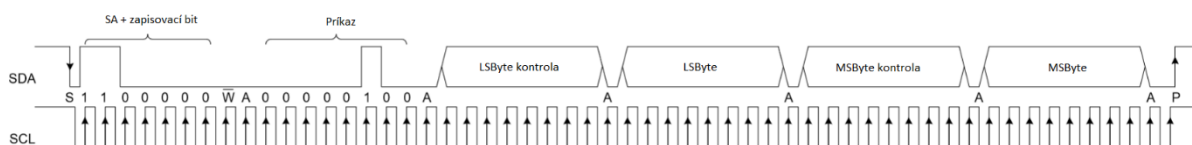
Podľa nastavenia konfigurácie dokáže snímať teploty do 1100 °C. Termokamera je ku EduKITu pripojená cez I<sup>2</sup>C zbernicu, na piny ktoré popisuje Obrázok 3 . Princíp práce I<sup>2</sup>C je vysvetlený v [7].



Obrázok 3 Označenie pinov pre pripojenie temokamery do mikrokontroléru [3]

### 2.1.1 Nastavenie senzoru

Senzor je možné nastaviť pomocou konfiguračného registru na požadované vlastnosti. Konfiguračný register sa zapisuje do RAM pamäte senzoru. Pred zapísaním konfiguračného registru na RAM pamäť je potrebné najprv zapísať hodnotu do EEPROM pamäte. Zápis do EEPROM pamäte je potrebný pre kontrolu, či je zápis do RAM pamäte správny.



Obrázok 4 Ukážka zápisu konfiguračného a oscilátorového registru [3]

Na obrázku 4 je znázornená I<sup>2</sup>C komunikácia pre zápis konfiguračného a oscilátorového registru. Zápis konfiguračného registru do RAM pamäte:

1. Štartovacia sekvencia
2. Zápis SA + zapisovací bit = 0xC0
3. Príkaz = 0x03
4. LSByte kontrola = EEPROM(0xF5) - 0x55
5. LSByte = užívateľom zrátaná hodnota konfiguračného registru
6. MSByte kontrola = EEPROM(0xF6) - 0x55
7. MSByte kontrola = užívateľom zrátaná hodnota konfiguračného registru
8. Stop sekvencia

Hodnoty EEPROM(0xF5) a EEPROM(0xF6) sú hodnoty získané z EEPROM pamäte a musia byť zhodné s užívateľom zadanými hodnotami pre LSByte a MSByte.

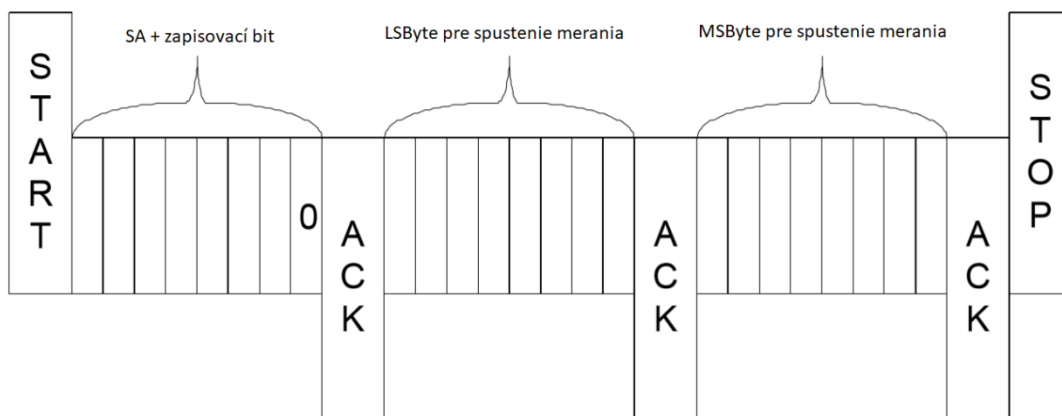
Výrobca udáva, že je možné zapísať aj nastavenie pre oscilátor, avšak neudáva požadované hodnoty pre správne nastavenie. Stále je potrebné nastaviť oscilátor.

Zápis prebieha posielaním sekvencie príkazov ako je znázornené na obrázku 4.

Nastavenie oscilátoru:

1. Štartovacia sekvencia
2. Zápis SA + zapisovací bit = 0xC0
3. Príkaz = 0x04
4. LSByte kontrola = EEPROM(0xF7) - 0xAA
5. LSByte = LSByte
6. MSByte kontrola = 0x00 – 0xAA
7. MSByte kontrola = 0x5E
8. Stop sekvencia

Okrem nastavenia rýchlosti snímkovania a snímanej teploty je možné ešte nastavenie termokamery na krokový mód. Pri krokovom móde termokamera urobí jedno meranie po ukončení sekvencie, ktorá je znázornená na obrázku 5. Rýchlosť merania je daná ako  $\frac{1}{F_{ps}}$ , kde  $F_{ps}$  je rýchlosť snímkovania. Pre nastavenie krokového módu je potrebné na siedmy bit konfiguračného registru zapísať 1.



Obrázok 5 Príkaz pre spustenie snímania v krokovom móde [3]

Spustenie merania v krokovom móde:

1. Štartovacia sekvencia
2. Zápis SA + zapisovací bit = 0xC0
3. LSByte pre spustenie merania = 0x01
4. MSByte pre spustenie merania = 0x08
5. Stop sekvencia

Meranie sa spustí hneď po prijatí stop sekvencie. Čítanie a spracovanie nasnímaných dát je rovnaké ako pre bežné snímkanie termokamery.



Obrázok 6 Zápis hodnôt do EEPROM pamäte [5]

Na obrázku 6 je znázornená komunikácia pre zápis hodnôt do EEPROM pamäte. Ukážka zápisu do EEPROM pamäte:

1. Štartovacia sekvencia
2. Zápis SA + zapisovací bit = 0xA0
3. Štartovacia adresa = adresa od ktorej budú dáta zapisované
4. Zapisovanie hodnôt, ktoré budú uložené do EEPROM pamäte za seba od štartovacej adresy.
5. Stop sekvencia

V sprievodnej dokumentácii [3] sa na str. 25 nachádza tabuľka pre zápis konfiguračného registru s požadovanými vlastnosťami.

Príklad nastavenia konfiguračného registru:

- 15 bit = 0, rezervované Melexis
- 14 bit = 1, ADC s nízkou referenciou povolený
- 13 bit = 0, rezervované Melexis
- 12 bit = 1, I<sup>2</sup>C môže pracovať do rýchlosti 1000 kbit/s
- 11 bit = 1, musí byť zapísané MD pre chod snímania
- 10 bit = 1/0, kontroluje funkčnosť programu, nezapisuje sa do neho
- 9 bit = 1/0, nezapisuje sa do neho, iba číta či prebieha meranie IR dát
- 8 bit = NA, nezáleží na tom, čo sa do neho zapíše
- 7 bit = 0, normálny mód
- 6 bit = 0, sústavné snímkovanie
- [5:4] bit = 11, meraný objekt bude mať teplotu do 500 °C
- [3:0] bit = 0000, snímkovanie nastavené na 512 Hz

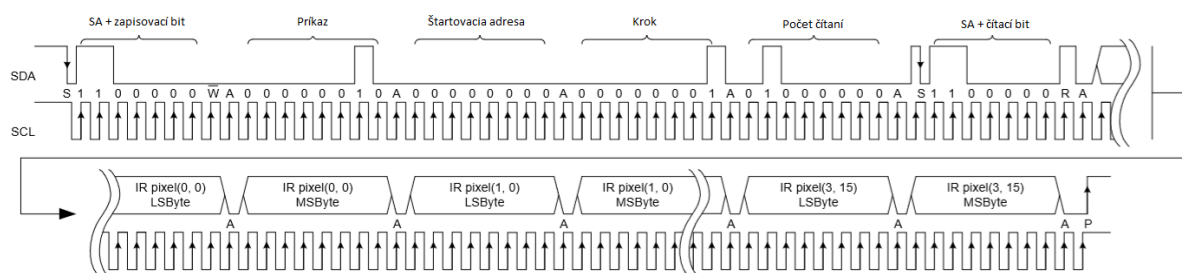
Pre takéto nastavenie senzoru bude do EEPROM pamäte zapísaná na adresu 0xF5 hodnota 0x30 a na adresu 0xF6 hodnota 0x5E.

Zápis do RAM pamäte potom bude vyzeráť:

1. Štartovacia sekvencia
2. Zápis SA + zapisovací bit = 0xC0
3. Príkaz = 0x03
4. LSByte kontrola = EEPROM(0xF5) - 0x55 = 0x30 - 0x55 = 0xDB
5. LSByte = 0x30
6. MSByte kontrola = EEPROM(0xF6) - 0x55 = 0x5E - 0x55 = 0x09
7. MSByte kontrola = 0x5E
8. Stop sekvencia

## 2.1.2 Čítanie dát senzoru

V pamäti EEPROM sú uložené konštanty pre výpočet teploty a v pamäti RAM snímané dáta.



Obrázok 7 Ukážka vyčítania dát z RAM pamäte [3]



Na obrázku 7 je zobrazená I<sup>2</sup>C komunikácie pre vyčítanie snímaných dát z adresy RAM.

Hodnoty pre vyčítanie dát zo všetkých pixelov z RAM pamäte:

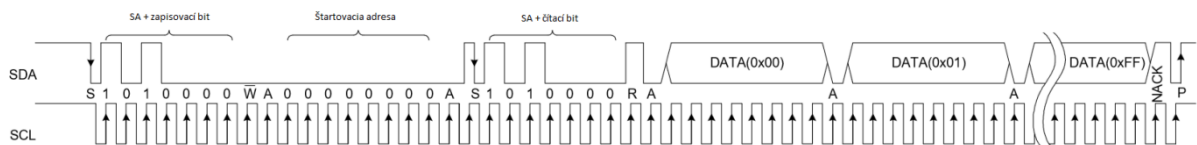
1. SA + zapisovací bit = 0xC0
2. Príkaz = 0x02
3. Štartovacia adresa = 0x00
4. Krok = 0x01
5. Počet čítaní = 0x40
6. SA + čítací bit = 0xC1

Tieto príkazy slúžia pre zistenie snímaných IR hodnôt senzorom. Avšak pre celkový výpočet, je potrebné ešte z pamäte RAM získať hodnoty kompenzačného pixelu a PTAT<sub>data</sub> pre výpočet teploty senzoru. Výrobca senzoru v sprievodnej dokumentácii [3] uvádza, že zvyšné dve hodnoty je potrebné vyčítať v samostatných krokoch. Avšak funguje príkaz rovnaký pre čítanie celého poľa, ale zmení sa príkaz počet čítaní na 0x42. Týmto spôsobom je možné vyčítať všetky hodnoty z RAM pamäte potrebné pre výpočet snímanej teploty v jednom kroku.

Z pamäte RAM, je ešte potrebné čítať hodnotu konfiguračného registru. Postup čítania je rovnaký ako pre čítanie IR dát, avšak zmenia sa zadávané hodnoty.

Hodnoty pre vyčítanie konfiguračného registru:

1. SA + zapisovací bit = 0xC0
2. Príkaz = 0x02
3. Štartovacia adresa = 0x92
4. Krok = 0x00
5. Počet čítaní = 0x01
6. SA + čítací bit = 0xC1



Obrázok 8 Ukážka vyčítania dát z EEPROM pamäte [3]

Na obrázku 8 je znázornená komunikácia pre vyčítanie dát z EEPROM pamäte.

Hodnoty pre vyčítanie EEPROM pamäte:

1. SA + zapisovací bit = 0xA0
2. Štartovacia adresa = 0x00
3. SA + čítací bit = 0xA1

Pre čítanie z EEPROM pamäte sa zapíše mimo SA len štartovacia adresa a od nej posiela postupne vždy po jednej adrese hodnoty až kým MD nepošle NACK.

### 2.1.3 Výpočet snímanej teploty

Adresy na ktorých sú uložené jednotlivé koeficienty a snímané hodnoty sú v sprievodnej dokumentácii [3]. Snímané hodnoty je potrebné zložiť do 16-bitových čísel, nakoľko sú posielané ako 8-bitové hodnoty. Konštanty môžu byť 16-bitové čísla ale uložené sú taktiež ako 8-bitové hodnoty. Zloženie do 16-bitových čísel je ukázané v rovnici 1. Znamienková kontrola pre znamienkové 16-bitové hodnoty je ukázaná v rovnici 2 a pre 8-bitové hodnoty v rovnici 3.

$$(1) X_y = 256 * X_{y_H} + X_{y_L}$$

$$(2) X_y > 32767 \rightarrow X_y = X_y - 65536$$

$$(3) X_y > 128 \rightarrow X_y = X_y - 256$$

Výpočet teploty senzoru:

$$(4) T_a = \frac{-K_{T1} + \sqrt{K_{T1}^2 - 4 * K_{T2} * (V_{TH}(25) - PTAT_{data})}}{2 * K_{T2}} + 25, [^{\circ}C]$$

$$(5) V_{TH}(25) = \frac{V_{TH}(25)}{2^{3-ConfigReg[5:4]}}$$

$$(6) K_{T1} = \frac{K_{T1}}{2^{K_{T1scale}[7:4] * 2^{3-ConfigReg[5:4]}}}$$

$$(7) K_{T2} = \frac{K_{T2}}{2^{K_{T2scale}[3:0] + 10 * 2^{3-ConfigReg[5:4]}}}$$

PTAT<sub>data</sub> je hodnota, ktorá je uložená v RAM pamäti senzoru, ako 16-bitová znamienková hodnota. Hodnoty V<sub>TH</sub>(25) K<sub>T1</sub>, K<sub>T2</sub>, sú konštanty v EEPROM pamäti uložené ako 16 bitové znamienkové hodnoty. K<sub>T1scale</sub>[7:4] a K<sub>T2scale</sub>[3:0] sú 4-bitové exponenty uložené v 8 bitovom čísle. ConfigReg[5:4] je hodnota 5 a 4 bitu v konfiguračnom registri, ktorý je čítaný z RAM pamäte.

Výpočet snímanej teploty:

$$(8) T_o(i, j) = \sqrt[4]{\frac{V_{IR(i,j)COMPENSATED}}{\alpha_{comp}(i,j) * (1 - K_{S4} * 273.15) + S_X(i,j)}} + T_{aK4} - 273.15, [^{\circ}C]$$

- V<sub>IR(i,j)COMPENSATED</sub> je parazitický IR kompenzačný signál, ktorý sa vypočíta podľa rovnice 17
- α<sub>comp</sub>(i,j) je kompenzačný citlivostný koeficient pre každý pixel
- K<sub>S4</sub> je kompenzačný faktor pre senzitivitu, pre kamery typu BAB a BAD je K<sub>S4</sub> = 0
- T<sub>aK4</sub> = (T<sub>a</sub> + 273.15)<sup>4</sup>, kde T<sub>a</sub> je teplota snímača vypočítaná podľa rovnice 4
- S<sub>X</sub>(i, j) = K<sub>S4</sub> \*  $\sqrt[4]{\alpha_{comp}(i,j)^3 * V_{IR(i,j)COMPENSATED} + \alpha_{comp}(i,j)^4 * T_{aK4}}$

Výpočet V<sub>IR(i,j)COMPENSATED</sub>:

1. Kompenzačný offset

$$(9) V_{IR(i,j)offsetCompensated} = V_{IR(i,j)} - (A_{(i,j)} + B_{(i,j)} * (T_a - T_{a0}))$$

- V<sub>IR(i,j)</sub> je snímaná IR hodnota pre každý pixel, uložená v RAM pamäti ako 16-bitová znamienková hodnota.
- A<sub>(i,j)</sub> je offset pre každý pixel

$$(10) A_{(i,j)} = \frac{A_{common} + \Delta A_{i(i,j)} * 2^{\Delta A_{iscale}}}{2^{3-ConfigReg[5:4]}}$$

- $A_{common}$  je minimálny offset uložený v EEPROM ako 16-bitová znamienková hodnota
- $\Delta A_{i(i,j)}$  je rozdiel medzi offsetom pre každý pixel a minimálnou hodnotou, v EEPROM je uložená ako 8-bitová znamienková hodnota
- $\Delta A_{i\_scale}$  je koeficient pre úpravu mierky pre  $\Delta A_i$  uložený v EEPROM ako [7:4] bit 8-bitového čísla.
- $B_{i(i,j)}$  je koeficient sklonu offsetu pre každý pixel

$$(11) B_{(i,j)} = \frac{B_{i(i,j)EEPROM}}{2^{B_{i\_scale} * 2^3 - ConfigReg[5:4]}}$$

- $B_{i(i,j)EEPROM}$  je hodnota uložená v EEPROM ako 16-bitová znamienková hodnota
- $B_{i\_scale}$  koeficient úpravy mierky pri úprave sklonu offsetu pre jednotlivé pixely hodnota je uložená v EEPROM ako [3:0] bit 8-bitového čísla
- $T_a$  je teplota senzoru ako bola zrátaná vo vzorci 4
- $T_{a0} = 25^\circ C$ , je to konštanta

## 2. Kompenzácia termálneho gradientu

$$(12) V_{IR(i,j)TGCCompensated} = V_{IR(i,j)OffsetCompensated} - TGC * V_{IRcpOffsetCompensated}$$

- $V_{IRcpOffsetCompensated}$  kompenzácia offsetu IR signálu pre kompenzáciu termálneho gradientu.

$$(13) V_{IRcpOffsetCompensated} = V_{CP} - (A_{CP} + B_{CP} * (T_a - T_{a0}))$$

- $V_{CP}$  je IR hodnota kompenzačného pixelu, v RAM pamäti je uložená ako 16-bitová znamienková hodnota
- $A_{CP}$  je offset kompenzačného pixelu.

$$(14) A_{CP} = \frac{A_{CPEEPROM}}{2^{3-ConfigReg[5:4]}}$$

- $A_{CP\_EEPROM}$  je konštanta uložená v EEPROM pamäti ako 16-bitová znamienková hodnota.
- $B_{CP}$  je koeficient sklonu offsetu pre kompenzačný pixel

$$(15) B_{CP} = \frac{B_{CPEEPROM}}{2^{B_{i\_scale} * 2^3 - ConfigReg[5:4]}}$$

- $B_{CP\_EEPROM}$  je konštanta uložená v EEPROM pamäti ako 8-bitová znamienková hodnota

$$(16) TGC = \frac{TGC_{EEPROM}}{32}$$

- $TGC_{EEPROM}$  je koeficient uložený v EEPROM pamäti ako 8-bitová znamienková hodnota

## 3. Kompenzácia emisivity

$$(17) V_{IR(i,j)COMPENSATED} = \frac{V_{IR(i,j)TGCCompensated}}{\epsilon}$$

- $\epsilon$  je koeficient emisivity uložený v EEPROM pamäti ako 16-bitová neznamienková hodnota

$$(18) \varepsilon = \frac{256 * \varepsilon_H + \varepsilon_L}{32768}$$

#### 4. Výpočet $\alpha_{comp(i,j)}$

$$(19) \alpha_{comp(i,j)} = (1 + KsTa * (Ta - Ta_0)) * (\alpha_{(i,j)} - TGC * \alpha_{cp})$$

- KsTa je závislosť Ta na  $\alpha_{comp(i,j)}$ , uložená v EEPROM pamäti ako 16-bitová znamienková hodnota

$$(20) KsTa = \frac{256 * KsTa_H + KsTa_L}{2^{20}}$$

- $\alpha_{0\_H}$ ,  $\alpha_{0\_L}$ ,  $\alpha_{cp\_H}$ ,  $\alpha_{cp\_L}$ ,  $\Delta\alpha_{(i,j)}$ ,  $\alpha_{0\_scale}$  sú hodnoty uložené v EEPROM pamäti ako 8-bitové neznamienkové hodnoty.

$$(21) \alpha_{(i,j)} = \frac{\frac{256 * \alpha_{0\_H} + \alpha_{0\_L}}{2^{\alpha_{0\_scale}}} + \frac{\Delta\alpha_{(i,j)}}{2^{\Delta\alpha_{scale}}}}{2^{3 - ConfigReg[5:4]}}$$

$$(22) \alpha_{cp} = \frac{256 * \alpha_{cp\_H} + \alpha_{cp\_L}}{2^{\alpha_{0\_scale} * 2^{3 - ConfigReg[5:4]}}}$$

$$(23) K_{s4} = \frac{K_{s4\_EE}}{2^{(K_{s\_scale} + 8)}}$$

Vzorce 4 až 24 sú prevzaté zo sprievodnej dokumentácie termokamery [3].

#### 2.1.4 Vzorový výpočet

Vzorový výpočet slúži pre ukážku, ako sú dáta z termokmery spracované, pre výpočet snímanej teploty.

V tabuľke 1 sa nachádzajú prijaté konštanty z EEPROM pamäte pre výpočet teploty senzoru.

Tabuľka 1 Uložené hodnoty v EEPROM pamäti pre výpočet teploty senzoru

EEPROM adresa	Názov	Hodnota
0xDA	V <sub>TH_L</sub>	157
0xDB	V <sub>TH_H</sub>	100
0xDC	K <sub>TL_L</sub>	179
0xDD	K <sub>TL_H</sub>	86
0xDE	K <sub>T2_L</sub>	243
0xDF	K <sub>T2_H</sub>	94
0xD2	K <sub>T_scale</sub>	139

Konfiguračný register, PTAT<sub>data</sub> a dáta snímané jedným pixelom sú hodnoty získané z RAM pamäte a nachádzajú sa v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Hodnoty vyčítané z RAM pamäte

RAM adresa	Názov	Hodnota
0x92	ConfigReg <sub>L</sub>	63
	ConfigReg <sub>H</sub>	70
0x40	PTAT <sub>data_L</sub>	209
	PTAT <sub>data_H</sub>	100
0x00	V <sub>IR(1,1)_L</sub>	18
	V <sub>IR(1,1)_H</sub>	255

- Výpočet teploty senzoru je podľa vzorca 4

$$Ta = \frac{-K_{T1} + \sqrt{K_{T1}^2 - 4 * K_{T2}^2 * (V_{TH}(25) - PTAT_{data})}}{2 * K_{T2}} + 25$$

- $V_{TH}$  je 16-bitová znamienková hodnota ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2 a spracovaná je podľa vzorca 5

$$V_{TH}(25) = 256 * V_{THH} + V_{THL} = 256 * 100 + 157 = 25757$$

$$25757 < 32767 \rightarrow V_{TH}(25) = 25757$$

$$V_{TH}(25) = \frac{V_{TH}(25)}{2^{3-ConfigReg[5:4]}} = \frac{25757}{2^{3-3}} = 25757$$

- $K_{T1}$  je 16-bitová znamienková hodnota ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2 a spracovaná je podľa vzorca 6

$$K_{T1} = 256 * K_{T1H} + K_{T1L} = 256 * 86 + 179 = 22195$$

$$22195 < 32767 \rightarrow K_{T1} = 22195$$

$$K_{T1} = \frac{K_{T1}}{2^{K_{T1scale}[7:4] * 2^{3-ConfigReg[5:4]}}} = \frac{22195}{2^8 * 2^{3-3}} = 86.6992$$

- $K_{T2}$  je 16-bitová znamienková hodnota ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2 a spracovaná je podľa vzorca 7

$$K_{T2} = 256 * 94 + 243 = 24307$$

$$24307 < 32767 \rightarrow K_{T2} = 24307$$

$$K_{T2} = \frac{K_{T2}}{2^{K_{T2scale}[3:0] + 10} * 2^{3-ConfigReg[5:4]}} = \frac{24307}{2^{11+10} * 2^{3-3}} = 0.01159$$

- $PTAT_{data}$  je 16-bitová znamienková hodnota ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2 a spracovaná je podľa vzorca 8

$$PTAT_{data} = 256 * PTAT_{dataMSByte} + PTAT_{dataLSByte} = 256 * 100 + 209 = 25809$$

- Po dosadení vypočítaných hodnôt je po dosadení do rovnice 4 výsledná teplota:

$$Ta = \frac{-86.992 + \sqrt{86.992^2 - 4 * 0.01159 * (25757 - 25809)}}{2 * 0.01159} + 25 = 25.598 [^{\circ}C]$$

Tabuľka 3 Konštanty z EEPROM pamäte pre výpočet snímanej teploty jedným pixelom

EEPROM adresa	Názov	Hodnota
0x00	$\Delta A_{i(1,1)}$	5
0x40	$B_{i(1,1)}$	149
0x80	$\Delta \alpha_{(1,1)}$	46
0xC0	$K_{s\_scale}$	0
0xC4	$K_{S4\_EE}$	0
0xD0	$A_{common\_L}$	133
0xD1	$A_{common\_H}$	255
0xD8	TGC	0
0xD9	$\Delta A_{i\_scale}, B_{i\_scale}$	7
0xE0	$\alpha_{0\_L}$	80
0xE1	$\alpha_{0\_H}$	97
0xE2	$\alpha_{0\_scale}$	39
0xE3	$\Delta \alpha_{scale}$	33
0xE4	$\epsilon_L$	0
0xE5	$\epsilon_H$	128
0xE6	$K_{sTaL}$	0
0xE7	$K_{sTaH}$	0

V tabuľke 3 sa nachádzajú prijaté konštanty z EEPROM pamäte pre výpočet snímanej teploty jedným pixelom.

- Teplota snímaného objektu je vyrátaná pomocou vzorca 8

$$T_o(i,j) = \sqrt[4]{\frac{V_{IR(i,j)COMPENSATED}}{\alpha_{comp}(i,j) * (1 - K_{S4} * 273.15) + S_X(i,j)}} + T_{a_{K4}} - 273.15, [^{\circ}C]$$

- $V_{IR(i,j)COMPENSATED}$  sa ráta podľa vzorca 17

$$V_{IR(i,j)COMPENSATED} = \frac{V_{IR(i,j)TGCCompensated}}{\epsilon}$$

- $V_{IR(i,j)TGCCompensated}$  je vypočítané podľa vzorca 12  

$$V_{IR(i,j)TGCCompensated} = V_{IR(i,j)OffsetCompensated} - TGC * V_{IRcpOffsetCompensated}$$
- Pretože  $TGC = 0$ , tak  $V_{IR(i,j)COMPENSATED} = \frac{V_{IR(i,j)offsetCompensated}}{\epsilon}$
- $V_{IR(i,j)offsetCompensated}$  je vypočítané podľa vzorca 9

$$V_{IR(i,j)offsetCompensated} = V_{IR(i,j)} - (A_{(i,j)} + B_{(i,j)} * (Ta - Ta_0))$$

- $V_{IR(i,j)}$  je 16-bitová znamienková hodnota ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2

$$V_{IR(1,1)} = 256 * V_{IR(1,1)_{MSByte}} + V_{IR(1,1)_{LSByte}} = 256 * 255 + 18 = 65298$$

$$65298 > 32767 \rightarrow V_{IR(1,1)} = 65298 - 65536 = -238$$

- $A_{common}$  je 16-bitová znamienková hodnota, ktorá je zložená podľa vzorca 1, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 2

$$A_{common} = 256 * A_{common_H} + A_{common_L} = 256 * 255 + 133 = 65413$$

$$65413 > 32767 \rightarrow A_{common} = 65413 - 65536 = -123$$

- $A_{(i,j)}$  je vypočítaná podľa vzorca 10

$$A_{(i,j)} = \frac{A_{common} + \Delta A_{i(1,1)} * 2^{\Delta A_{i_{scale}}}}{2^{3-ConfigReg[5:4]}} = \frac{-123 + 5 * 2^0}{2^{3-3}} = -118$$

- $B_{i(1,1)_{EEPROM}}$  je 8-bitová znamienková hodnota, znamienková kontrola prebieha podľa vzorca 3

$$149 > 127 \rightarrow B_{i(1,1)_{EEPROM}} = 149 - 256 = -107$$

- $B_{(i,j)}$  je hodnota vypočítaná podľa vzorca 11

$$B_{(1,1)} = \frac{B_{i(1,1)_{EEPROM}}}{2^{B_{i_{scale}} * 2^{3-ConfigReg[5:4]}}} = \frac{-107}{2^7 * 2^{3-3}} = -0.836$$

- $Ta_0$  je konštanta

$$Ta_0 = 25$$

- Po dosadení vypočítaných hodnôt do rovnice 9 je potom hodnota  $V_{IR(1,1)_{offsetCompensated}}$   
 $V_{IR(1,1)_{offsetCompensated}} = -238 - (-118 - 0.836 * (25.598 - 25)) = -119.5$

- $E$  je vypočítaný podľa rovnice 18

$$\varepsilon = \frac{256 * \varepsilon_H + \varepsilon_L}{32768} = \frac{256 * 128 + 0}{32768} = 1$$

- Po dosadení do rovnice 17 je potom:

$$V_{IR(1,1)_{COMPENSATED}} = \frac{V_{IR(1,1)_{offsetCompensated}}}{\varepsilon} = \frac{-119.5}{1} = -119.5$$

- $\alpha_{(i,j)}$  je hodnota vypočítaná podľa vzorca 21

$$\alpha_{(1,1)} = \frac{\frac{256 * \alpha_{0_H} + \alpha_{0_L}}{2^{\alpha_{scale}}} + \frac{\Delta\alpha_{(1,1)}}{2^{\Delta\alpha_{scale}}}}{2^{(3-ConfigReg(5:4))}} = \frac{\frac{256 * 97 + 80}{2^{39}} + \frac{46}{2^{33}}}{2^{3-3}} = 5.067 * 10^{-8}$$

- Pretože hodnoty KsTa a TGC sú rovné 0, tak po dosadení do rovnice 19 je  $\alpha_{(i,j)comp}$

$$\alpha_{(1,1)comp} = \alpha_{(1,1)} = 5.067 * 10^{-8}$$

- Výpočet  $T_{aK4}$  prebieha podľa vzorca

$$T_{aK^4} = (Ta + 273.15)^4 = (25.598 + 273.15)^4 = 7965628100$$

- Pretože sa  $K_{s4}$  rovná 0, tak aj hodnota  $S_x$  je rovná 0 a po dosadení vypočítaných hodnôt do rovnice 8 je výpočet snímanej teploty pre jeden pixel:

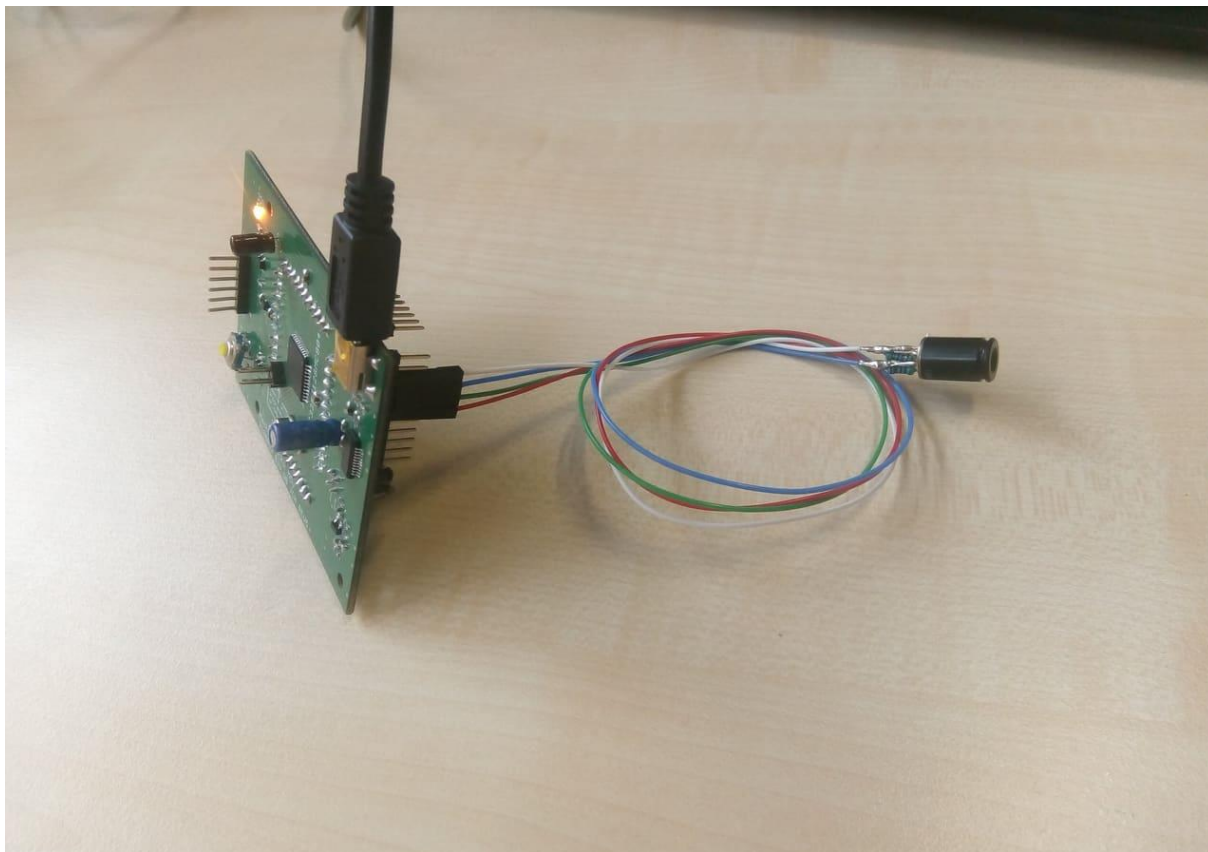
$$T_{o(1,1)} = \sqrt[4]{\frac{-119.5}{5.067 * 10^{-8}} + 7965628100} - 273.15 = 0.495$$

Nasnímaná teplota je v stave bez kalibrácie. V prípade že kalibrácia už bola uskutočnená, tak výsledná snímaná teplota by bola  $T_o = T_o + T_c$ . Spôsob akým je  $T_c$  vypočítané je popísaný v kapitole 2.2.2.



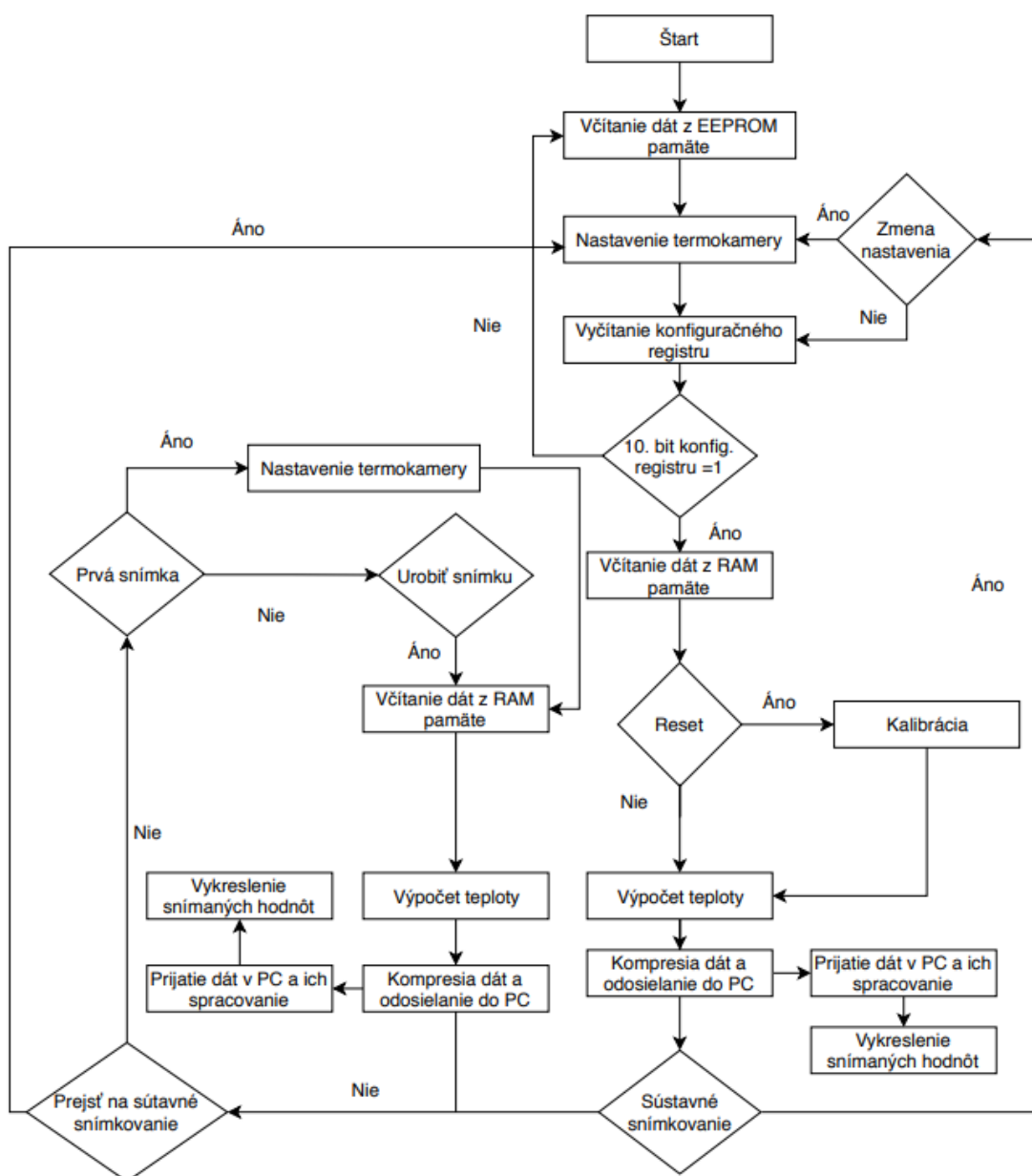
## 2.2 Mikrokontrolér a programovanie

Senzor je pripojený ku vývojovej doske EduKIT s mikroprocesorom dsPIC33FJ128MC804 od firmy MICROCHIP. Senzor je ku EduKITu pripojený cez I<sup>2</sup>C zbernicu a EduKIT posieľa dáta do PC cez UART. Princíp práce UARTu je popísaný v [8] na str. 37. Pripojenie termokamery do EduKITu je znázornené na obrázku 9.



*Obrázok 9 Pripojenie termokamery ku EduKITu.*

Princíp práce mikrokontroléru je zobrazený na obrázku 10. Hneď po zapnutí mikrokontroléru prebieha vyčítanie dát z EEPROM pamäte senzoru a nastavenie termokamery. Nasleduje zápis konfiguračného a oscilačného registru. Pre kontrolu, že kamera pracuje správne, je potrebné spätne vyčítať konfiguračný register. Kontroluje sa 10. bit v registri, v prípade že sa rovná nule, je potrebné znovu vyčítať EEPROM pamäť a nastaviť senzor. Táto kontrola prebieha pri každej novej snímke. V prípade, že sa rovná jednej, tak sú zo senzoru čítané snímané dáta z RAM pamäte. Následne sa kontroluje, či bola užívateľom zadaná požiadavka na reset. V prípade, že bola, prebehne kalibrácia termokamery. Kalibráciu je potrebné spraviť pred začatím meraní, pretože dáta bez kalibrácie nie sú správne. Nasleduje výpočet teploty, kompresia dát a odosielanie do PC. Po odoslaní dát do PC prebieha kontrola, či pokračuje sústavné snímkovanie. V prípade že áno, prebieha kontrola zmeny nastavenia termokamery užívateľom. Ak bola zadaná požiadavka, tak sa znovu zapíše konfiguračný register s požadovanými vlastnosťami. Takýmto spôsobom prebieha sústavné snímkovanie. V prípade že bolo zvolené nesústavné snímkovanie, kamera sa dá do krokového módu. Prebieha kontrola, či sa jedná o prvú snímku. Ak sa jedná o prvú snímku, tak je potrebné zapísať konfiguračný register a vyhotoví sa snímka rovnakým spôsobom ako pri sústavnom snímkovaní. Jediný rozdiel v ďalších krokoch je, že termokamera nevyhotoví novú snímku, kým užívateľ nezadá požiadavku. V prípade že sa má ukončiť nesústavné snímkovanie, je potrebné zapísať konfiguračný register. V oboch typoch snímkovania sú dáta po odoslaní do PC prijaté, dekomprimované a vykresľované.



Obrázok 10 Vývojový diagram

## 2.2.1 Programovanie mikrokontroléru

Kompilovaný projekt, ktorý je nahratý do mikrokontroléru sa rozdeľuje na štyri hlavné časti. Je to riadiaci súbor „main.c“, ktorý ovláda činnosti zvyšných častí. Pre vyčítanie dát senzoru a nastavenie senzoru, slúžia funkcie ktoré sú definované v súbore „I2C.c“. Vyčítanie a zapisovanie dát je riešené cez knižnicu ktorá riadi I<sup>2</sup>C softvérovo. Výpočtové operácie prebiehajú v súbore „vypocty.c“ a kompresia a odosielanie dát v súbore „kompresia.c“. Spomínané súbory sú priložené v prílohe.

## 2.2.2 Výpočet teploty na mikrokontroléri

Výpočtový súbor obsahuje funkciu pre výpočet teploty senzoru a kontroluje, či je potrebné urobiť kalibráciu.

Obidve funkcie v sebe rátajú snímanú teplotu. Prijaté hodnoty sú uložené ako XX\_R. Je to z dôvodu, že všetky hodnoty získané zo senzoru sú do mikrokontroléru posielané ako neznamienkové celočíselné hodnoty a tak sa aj ukladajú. Pre správne určenie ich skutočných hodnôt, prebieha pri väčšine znamienková kontrola, ktorá je však už ukladaná do formátu

znamienkových celočíselných hodnôt. Hodnoty, ktoré sú výsledkami rovníc už môžu byť aj desatinné čísla, preto sú ukladané do formátu float (hodnôt s plávajúcou čiarkou). Nakoľko sa cez UART nedajú posilať hodnoty formátu float (s plávajúcou čiarkou), sú vypočítané hodnoty prevádzané naspäť na celočíselné hodnoty. Týmto spôsobom sa stráca presnosť na desatinné miesta, avšak táto presnosť je zanedbateľná pri odchýlkach ktoré vznikajú pri meraní. Odchýlky pri meraní, kedy má senzor teplotu do 50 °C sa pohybujú zhruba do  $\pm 1$  °C. Presnejší popis výpočtu tolerancií sa nachádza v kapitole 2.4.

Výpočet kalibračnej teploty slúži pre správne nastavenie snímanej teploty. Vo funkcii prebieha kontrola, či užívateľ požiadal o vykonanie kalibrácie. Senzor by mal byť orientovaný do voľného priestoru, čo znamená, že v blízkom okolí nesníma žiadne telesá, prípadne telesá, ktoré majú teplotu okolia. Nakoľko senzor pracuje na princípe termočlánku, tak sníma zmenu teploty medzi meracím spojom a zrovnávajúcim spojom. Pri snímaní do voľného priestoru, snímaná teplota nezodpovedá teplote okolia (teplote senzoru), preto je potrebné spraviť kalibráciu teploty. Teplota v meracom spoji je známa, pretože je vypočítaná teplota senzoru. Preto je možné spraviť kalibračnú teplotu, ktorá sa rovná rozdielu teploty senzoru a snímanej teploty.

$$(24) T_c = |T_a - T_o|$$

Kde  $T_c$  [°C] je kalibračná teplota  $T_a$  [°C] teplota senzoru a  $T_o$  [°C] snímaná teplota. Kalibračná teplota slúži pri výpočte snímanej teploty ako konštanta, ktorá sa pripočítava ku snímanej teplote.

### 2.2.3 Kompresia a odosielanie dát

Pre kompresiu dát bola zvolená delta kompresia, ktorá je účinná pre hodnoty s malými rozdielmi. Vybraná bola za predpokladu, že teleso bude svoju tepelnú energiu odovzdávať do priestoru lineárne. Hodnoty získané z pixelov uložených vedľa seba, by mali byť podobné a lineárne voči sebe klesať alebo stúpať. Pri kompresii môžu vzniknúť záporné čísla, čo znamená, že jednotlivé hodnoty sa musia posilať ako znamienkové hodnoty. V prípade že by vznikli záporné hodnoty, tak je potrebné posilať jeden bit navyše ku každému číslu. Tento bit rozhoduje o tom, či je číslo záporné alebo kladné. Aby sa tento bit posilať nemusel, tak program overuje, či sa nachádza v reťazci záporné číslo. V prípade že sa v reťazci nachádzajú záporné čísla, tak sa hľadá najmenšie z nich, ktoré sa následne pripočítava ku všetkým hodnotám. Pri čítaní hodnôt na strane PC sa hľadá nula, ktorá reprezentuje začiatok reťazca. Aby nedošlo k omylu a v poli sa nenachádzala nula, tak ku každej hodnote je ešte pripočítaná jednotka.

Takto skomprimované hodnoty sa následne analyzujú a hľadá sa číslo s najväčším počtom bitov. Následne sa komprimované hodnoty začnú ukladať do 32-bitového čísla. Ukladanie čísel prebieha bitovým posunom, ktorý odpovedá číslu s najväčším počtom bitov a pripočítaním ďalšej hodnoty v poradí. Funkcia kontroluje ukladanie hodnôt do tohto čísla a to tak, že sleduje či sa zmestí celá ďalšia hodnota. V prípade že sa hodnota nezместí, tak sa posunie na ďalšie 32-bitové číslo.

Príklad kompresie:

1.  $T_o$  je snímaný reťazec piatich pixelov  $T_o = [33, 34, 35, 34, 36]$
2. Ako prvé prebehne odčítanie hodnôt podľa vzorca  $T_k = (T_o[i - 1] - T_o[i])$
3. Potom  $T_k = [33, -1, -1, 1, -2]$
4. Nájde sa najmenšia hodnota  $\min = -2$
5. Pripočíta sa  $|\min|$   $T_k[i] = T_k[i] + |\min|$
6.  $T_k = [35, 1, 1, 3, 0]$
7. Na záver sa pripočíta jednotka  $T_k[i] = T_k[i] + 1$
8.  $T_k = [36, 2, 2, 4, 1]$ , hodnoty  $T_k$  v binárnej sústave  $T_k = [100100, 10, 10, 100, 1]$
9. Počet bitov pre jednotlivé hodnoty  $P_b = [6, 2, 2, 3, 1]$
10. Najväčší počet bitov  $P_{\max} = 6$
11. Účinnosť kompresie  $\eta = \frac{8*i}{P_b*i} = \frac{8*5}{6*5} = 25 \%$
12. Ukladanie do 32-bitového čísla  $T_{k32} = (T_k \ll P_{\max}) + T_k[i]$
13. Hodnota  $T_{k32}$  je potom  $T_{k32} = 0b10\ 0100\ 0000\ 1000\ 0010\ 0001\ 0000\ 0001$

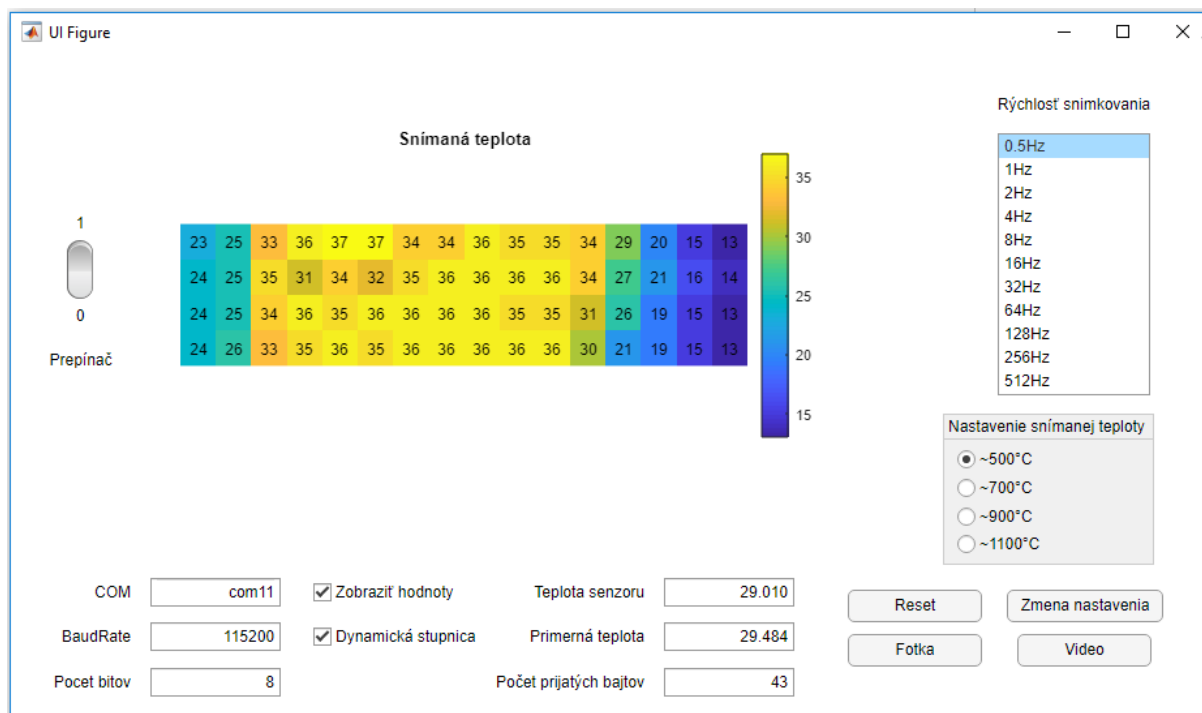
Pre čo najúčinnnejšiu kompresiu prebieha rozhodovanie, či je účinnejšie komprimovať dáta zoradené po stĺpcoch alebo riadkoch. Rozhodovanie prebieha podľa toho, koľko bajtov je nutné poslať pre všetky pixely. Nakoľko maximálny počet bitov pre naplnenie celého rozsahu snímaných teplôt, čo je od -40 do 1100 °C, je 11-bitov, tak sa kompresia vstáva vždy účinná. Maximálny reťazec, ktorý sa môže odoslať je tým pádom  $\frac{11*64}{8} = 88$  bajtov. V prípade že by kompresia neprebíhala, by sa teploty pre všetky pixely museli odosielať ako 16-bitové čísla a tým pádom by to bolo 128 bajtov. Po porovnaní kompresíí sa vytvorí konfigurácia, v ktorej je zadán na poslednom bite typ kompresie a na ostatných počet bajtov koľko sa pre danú snímku posíla.

Po kompresíí sa dáta odosielaajú. Ako prvá hodnota sa posíla 0, ktorá indikuje, že sa posíla ďalšia snímka. Následne sa odosiela konfigurácia, počet bitov po koľkých sú skomprimované hodnoty za seba ukladané a najmenšia hodnota ( $|\min|$ ). Nakoľko UART posíla 8-bitové čísla, je potrebné skomprimované 32-bitové číslo  $T_{k32}$  rozdeliť na niekoľko 8-bitových čísel. Keďže môže nastať prípad, kedy nie je naplnené celé 32-bitové číslo, tak sa podľa počtu obsadených bitov posílaajú iba čísla ktoré sa nerovnajú 0. Tento prípad nastáva keď najväčší počet bitov  $P_{\max}$  je iný ako 8. Po odoslaní všetkých skomprimovaných hodnôt sa ešte posíla aktuálna teplota senzoru.

## 2.3 Dekompresia dát a ich vykreslenie

Pre prijímanie, spracovanie prichádzajúcich dát a základné nastavovanie termokamery je vytvorené užívateľské rozhranie pomocou MATLABu, ktoré je zobrazené na obrázku 11. V aplikácii užívateľ zadáva port na ktorom je mikrokontrolér pripojený ku PC, BaudRate akým sú dáta posílané a v prípade zmeny počtu odosielaných bitov aj nastavenie počtu prichádzajúcich bitov. Týmto spôsobom prebehne správne nastavenie pre pripojenie sa ku mikrokontroléru. Následne je potrebné v aplikácii prepnúť prepínač do pozície „1“. Po prepnutí sa začnú vykresľovať snímky kamery. V aplikácii je prednastavené aby sa snímky vykresľovali v dynamickej stupnici a v každom pixeli sú zobrazené snímané teploty. Vypisovanie teplôt jednotlivých pixelov je možné vypnúť odklepnutím políčka „Zobraziť hodnoty“. Zmena stupnice z dynamickej na statickú je možné odklepnutím políčka „Dynamická stupnica“. Pri dynamickej stupnici sú okrajové podmienky pre vyhodnotenie zafarbenia pixelu nastavené podľa maximálnej a minimálnej hodnoty pixelov celého poľa. Pri statickej stupnici nepokrývajú pixeli celý farebný rozsah ale svetlejšie zafarbené pixely sú až pri určitom extrémne. V políčku „Teplota senzoru“ je zobrazovaná vypočítaná teplota senzoru. Teplota senzoru sa vypisuje pre kontrolu, aby nedošlo ku tepelnému preťaženiu senzoru, nakoľko pracovné teploty senzoru sú od -40 do 80 °C. Políčko „Priemerná teplota“ vypisuje priemernú teplotu celého snímaného poľa a políčko „Počet prijatých bajtov“ ukazuje, koľko

bajtov bolo prijatých pre pokrytie celého snímaného poľa. Tlačítka „Reset“ a „Zmena nastavenia“ slúžia pre ovládanie nastavenia konfigurácie termokamery. Po stlačení sa do termokamery nahrá požadované nastavenie zadané podľa „Rýchlosti snímkovania“ a „Nastavenie snímanej teploty“. Pri zmene nastavenia prebehne len zmena konfigurácie, zatiaľ čo pri resete nastane aj kalibrácia snímanej teploty. Tlačítko „Fotka“ ovláda termokameru princípom fotoaparátu, a termokameru dá do krokového módu. Pre spustenie tohto režimu je najprv potrebné vypnúť prepínač. Po stlačení tlačítka sa vykreslí iba jedna snímka a čaká sa na opätovné stlačenie. V prípade že sa má termokamera opätovne vrátiť do sústavného snímkovania, je potrebná stlačiť tlačítko „video“. Po stlačení sa znovu zapne vypínač a sústavné vykresľovanie teplôt znovu pokračuje. Skript pre spustenie užívateľského rozhrania sa nachádza v prílohe.



Obrázok 11 Ukážka vytvorenej aplikácie

### 2.3.1 Spracovanie prijatých dát

Po odoslaní sú dáta prijímané v PC. Po prepnutí prepínača v aplikácii do pozícií „1“, čaká program na prijatú hodnotu 0, ktorá indikuje, že začína nový reťazec. Následne je prijatá konfigurácia. V prvom kroku sa na základe konfigurácie analyzuje typ kompresie a potom počet bajtov koľko bude prijatých. Podľa informácie koľko bajtov bude prijatých, sa nastaví vektor o požadovanom počte prvkov a príjmu sa skomprimované dáta. Ďalej prichádzajú hodnoty koľko bitov zaberá jedná skomprimovaná teplota a minimálna hodnota. Ako posledná je prijatá teplota senzoru ktorá sa používa iba pre vypísanie v aplikácii.

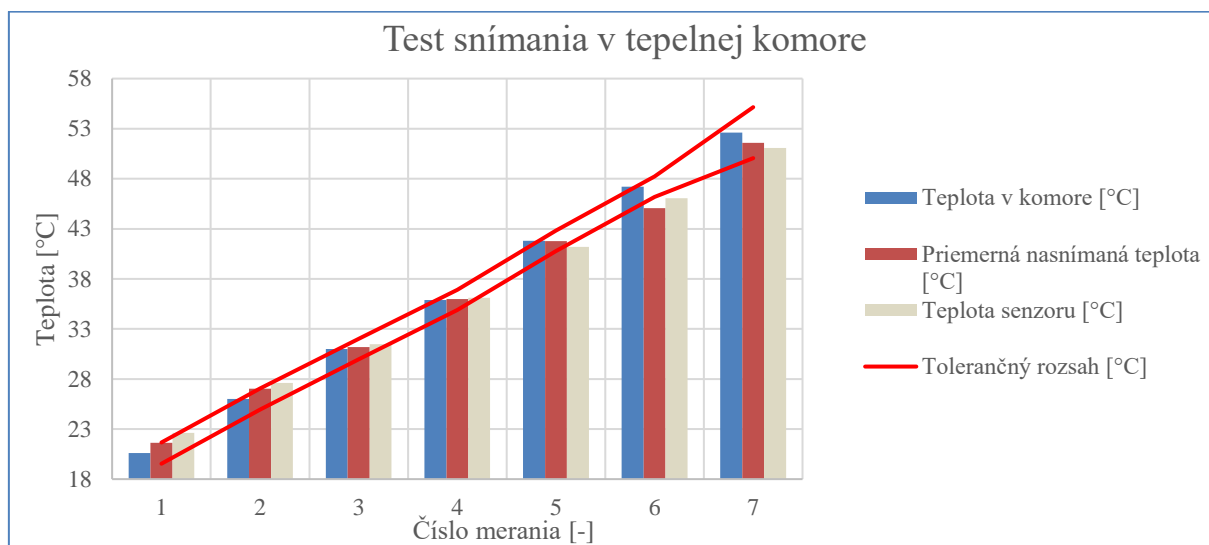
Po prijatí všetkých hodnôt začína ich dekompresia. Ako prvé, sa prijaté 8-bitové hodnoty vracajú späť do pôvodných odosielaných 32-bitových čísiel. Následne sa z týchto čísiel vytvorí vektor so 64-mi prvkami, na základe prijatej informácie o počte bitov pre jednu skomprimovanú teplotu. Po spätnom zrekonštruovaní dát, ktoré boli ukladané do 32-bitových čísiel, sa od nich odrátava minimálna hodnota, ku ktorej je ešte pripočítaná jednotka. Ako posledný krok dekompresie, sa už len odrátávajú hodnoty vo vektore od hodnoty, ktorá leží pred nimi. Po tomto kroku sú už všetky hodnoty späť zrekonštruované do pôvodných teplôt. Následne sa na základe typu kompresie rozmiestnia v správnom usporiadaní do matice. Táto matica je potom vykresľovaná do finálneho obrázku.

## 2.4 Testovanie a prezentácia výsledkov

Pre overenie správnosti funkčnosti a merania termokamery prebiehali testy. Boli prevedené dva testy, v ktorých sa kontrolovala nameraná hodnota so známou teplotou. V prvom teste bola kamera zavretá v tepelnej komore a bola zohrievaná. V druhom teste bola termokamera pri izbovej teplote a merala sa teplota vyhrievacej podložky.

### 2.4.1 Testovanie termokamery v tepelnej komore

Ako prvý prebiehal test v tepelnej komore. Testovalo sa splnenie tolerančného rozsahu pri dvíhaní teploty v komore. Merania začínali pri teplote komory  $\sim 20^\circ\text{C}$ , po ustálení teploty komory prebehlo meranie. Merania prebiehali po ustálení teploty komory, aby došlo ku zrovnaniu teploty vzduchu vo vnútri komory, stien komory a ustálenia teploty termokamery. Merania prebiehali s posunom po  $\sim 5^\circ\text{C}$  a rovnakým spôsobom prebiehali do  $\sim 50^\circ\text{C}$ . Výsledok meraní je znázornený v obrázku 12.



Obrázok 52 Výsledný graf testovania termokamery v tepelnej komore

Výrobca udáva toleranciu, v ktorej by sa mali nachádzať snímané hodnoty s ohľadom ku teplote senzoru. Tolerančný rozsah je v obrázku 12 znázornený červenými čiarami.

$$(25) T_{tolerancia} = T_o \pm 1^\circ\text{C} \pm 3\%|T_o - T_a|$$

Rovnica 25 udáva ako vypočítať toleranciu pre teplotu senzoru v rozsahu  $<0,50>^\circ\text{C}$ .  $T_o$  bola meraná teplota v komore a  $T_a$  teplota senzoru. Snímaná teplota sa nenachádzala v tolerančnom rozsahu len v prípade, kedy sa teplota senzoru blížila ku  $50^\circ\text{C}$ . Výpočet tolerančného rozsahu pre teplotu senzoru väčšiu než  $50^\circ\text{C}$  popisuje rovnica 26.

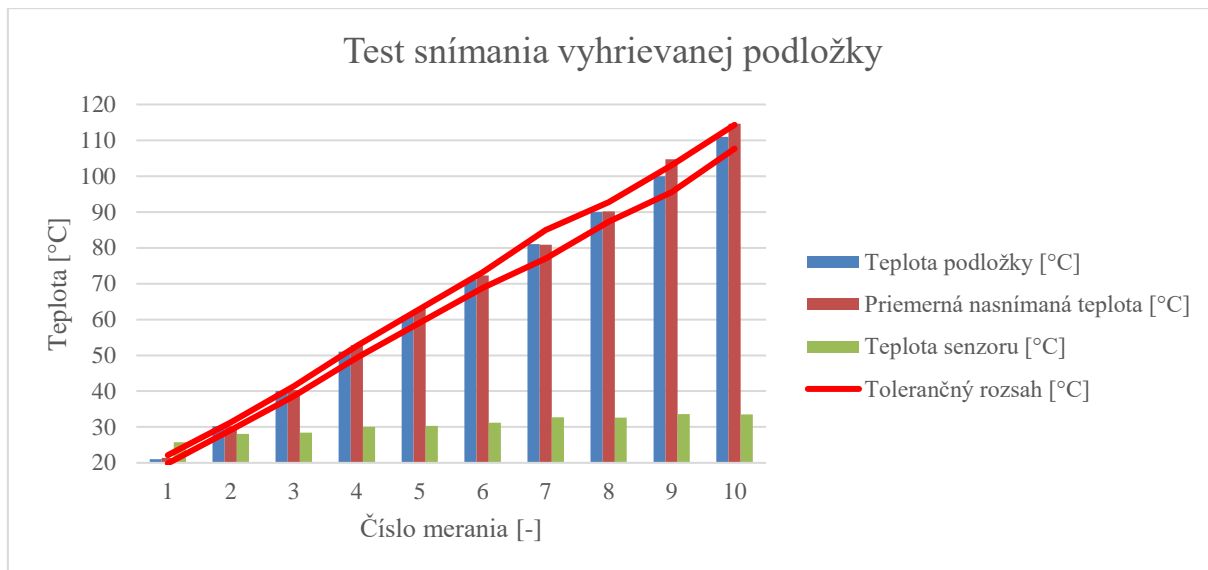
$$(26) T_{tolerancia} = T_o \pm 2,5^\circ\text{C} \pm 3\%|T_o - T_a|$$

Posledné meranie prebiehalo pri prekročení teploty senzoru  $50^\circ\text{C}$  a preto jeho tolerančný rozsah je rátný rovnicou 26.

Termokamera má najpresnejšie snímanie pri teplotách  $\sim 35^\circ\text{C}$ . Čím viac sa blíži ku krajnej hranici teploty senzoru pre daný tolerančný rozsah, tým je snímaná teplota menej presná.

## 2.4.2 Testovanie teploty snímaného objektu

Testovania prebiehalo snímaním vyhrievanej podložky. V tomto prípade, však už nebol zahrievaný celý senzor. Merania začínali pri teplote podložky  $\sim 20^\circ\text{C}$ , a postupovalo sa po  $10^\circ\text{C}$  po teplotu  $110^\circ\text{C}$ . Výsledky merania sú zobrazené v obrázku 13.



Obrázok 6 Výsledný graf testovania termokamery pri snímaní zahrievanej podložky

Ako je vidieť na obrázku 13, snímané teploty opäť ležia v tolerančnom rozsahu. Tolerančný rozsah bol rátný pomocou rovnice 25. Ako teplota  $T_o$  bola použitá známa teplota podložky a  $T_a$  teplota termokamery. Z výpočtu tolerančného rozsahu vyplýva, že čím je rozdiel medzi teplotou snímaného objektu a termokamery väčší, tým vzniká väčší tolerančný rozsah. Zmena tohto rozsahu je pozorovateľná na obrázku 13, kde oblasť medzi spodnou a hornou toleranciou sa zvyšuje so stúpajúcou teplotou snímaného objektu. V obrázku 13 je taktiež vidieť aj nárast teploty senzoru, čo bolo spôsobené zahrievaním senzoru od zahrievanej podložky.

## Záver

Rešeršná časť bola venovaná teórii bezkontaktného snímania teploty a bezstratovej kompresie. Bol popísaný princíp tepelného žiarenia telies a spôsoby, akými toto žiarenie môžeme detekovať. Nakoľko sa v druhej časti prakticky pracovalo s termokamerou, ktorá sníma tepelné žiarenie pomocou termočlánku, tak bol tento princíp podrobnejšie popísaný. Ďalej boli priblížené základné metódy spracovania obrazu v podobe kompresie. Pre spracovanie obrazu vytvoreného pomocou termokamery, bola požadovaná bezstratová kompresia. Z tohto typu kompresie boli analyzované dva najvhodnejšie spôsoby a to RLE a delta kompresia. Po porovnaní týchto dvoch kompresíí, bola pre danú aplikáciu zvolená ako vhodnejšia delta kompresia.

V druhej časti bola podrobne preskúmaná vybraná termokamera MLX90621-BAD. Pre otestovanie funkcionality bola pripojená ku vývojovej doske EduKIT. Pre správnu obsluhu termokamery bola vytvorená knižnica v programovacom jazyku C. Knižnica ovláda I2C zbernicu, UART, prepočty prijatých dát na snímané teploty, ich kompresiu a odosielanie do PC. Pre prijímanie, dekompresiu a vykresľovanie teplôt v PC bolo pomocou MATLABu vytvorené užívateľské rozhranie. Pomocou užívateľského rozhrania je možné okrem vykresľovania možné aj správne nastavenie portu, do ktorého je mikrokontrolér pripojený a základné ovládanie termokamery.

Ako posledné prebiehali na termokamere testy, pri ktorých bolo sledované správanie termokamery. Prvý test prebiehal v tepelnej komore, kde bola termokamera uzavretá a postupne sa zvyšovala teplota v komore. Sledovala sa teplota senzoru a taktiež aj teplota snímaného poľa. Po ukončení testovania sa zisťovalo, či teplota snímaného poľa zapadá do tolerančného rozsahu, ktorý udáva výrobca. Druhý test prebiehal pri izbovej teplote senzoru a sledovala sa teplota vyhrievacej podložky. Po ukončení testu bolo opäť zisťované, či teplota snímaného poľa zapadá do tolerančného rozsahu. Pri oboch testoch termokamera splnila požadované podmienky.



## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] Termomechanika. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. BRNO, 2011. ISBN ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2005. ISBN ISBN 80-7300-180-2.
- [3] MLX90621xxx. MLX90621 product datasheet [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90621-datasheet-melexis.pdf>
- [4] Úvod do kompresních algoritmů. Úvod do kompresních algoritmů [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=7019](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=7019)
- [5] 24AA02/24LC02B. MLX90621 EEPROM specifications [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/electrically-erasable-prom-datasheet-melexis.pdf?la=en>
- [6] Termoelektrický článek. In: Termoelektrický článek [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s\\_8\\_2.3.jpg](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_8_2.3.jpg)
- [7] Understanding the I2C Bus. *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [8] *Univerzální analyzátor sériových sběrnic*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

## **Zoznam použitých skratiek**

PC	Osobný počítač
UART	Univerzálny asynchrónny vysielateľ a prijímač
I <sup>2</sup> C	Inter-integrated circuit
SA	Slave adresa
MD	Master device
RAM	Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

## **Zoznam príloh**

1. Program v jazyku C pre mikrokontroler
2. MATLAB skript pre zobrazenie užívateľského rozhrania

Obidve prílohy sa nachádzajú na priloženom CD nosiči.